

## [27]全国共同利用研究成果報告

<https://hdl.handle.net/2324/7431319>

---

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 27, pp.1-, 2024-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



# 機械学習とトモグラフィーを用いたトカマク配位形成の 物理メカニズムの解明とその制御

東京工業大学 宗近 洸洋

## 1 背景・目的

核融合の分野では、トカマク型の国際熱核融合実験炉 ITERやJT-60SA（日本）が建設中であり、発電実証を行うための原型炉としてトカマク装置の概念設計が世界的に盛んに行われている。トカマク配位を形成するには、装置中央に置かれたソレノイドコイルによって発生させる周回電圧によりプラズマ電流を駆動する必要がある。一方、建設直後の装置では電流が立ち上りにくく、トカマク配位を形成するために長い時間を費やすことが多い。現在、前述のITERやJT60SAでは、ともに周回電場の値が低いため、効率的な電流立ち上げの方法が検討されている。この問題の解決には、プラズマ電流立ち上げに関する物理、特に低周回電場での電流立ち上げの物理的理解が不可欠である。しかし、トカマク配位形成の研究は数も少なく、十分な理解が得られていないため、その理解は喫緊の重要課題である。本研究では、九州大学応用力学研究所のPLATOトカマクにおいて、高速可視光カメラとインテンシファイアを用いてトカマク配位形成時のプラズマを観測し、最先端のトモグラフィー解析を通してトカマク配位形成の物理機構を探求する。PLATOでは周回電場がITERのそれに近い。そのため、PLATOは低周回電場での電流立ち上げに関しての希少な画像観測データなどを得ることができる。また、比較的高い周回電場を用いる東京工業大学の小型トカマク装置PHiXと比較することでトカマク配位形成の物理機構の理解を深めることができる。

## 2 実験方法

本研究における実験では、可視光高速カメラとイメージインテンシファイアを用いて、PLATOのトカマクプラズマ放電を高速撮像し、マクロ的なプラズマの成長過程を観測する。実験に用いた高速カメラはナックイメージテクノロジー社製のMEMRECAM ACS-1 M60、イメージインテンシファイアはInvisible社製のUVi(Model 1850-10-S25)、レンズはSIGMA社製 8-16mm 広角レンズであり、それらを組み合わせてトーラス接線方向に視野を持つように設置した(図1)。撮像速度(サンプリングレート)は100 kHzである。

トカマク放電立ち上げの方式として、①Trapped Particle Confinement (TPC)と、②Field Null Confinement (FNC)の2つの方式を用いて、トカマク配位形成の過程を観測した。また、TPCに関しては、途中でコンデンサー電源の追加磁束を加えることによるトカマクプラズマの成長過程についての実験③も行った。FNC実験に関しては、高強度の発光が予想されたため、インテンシファイアを取り外しての撮影を行った。

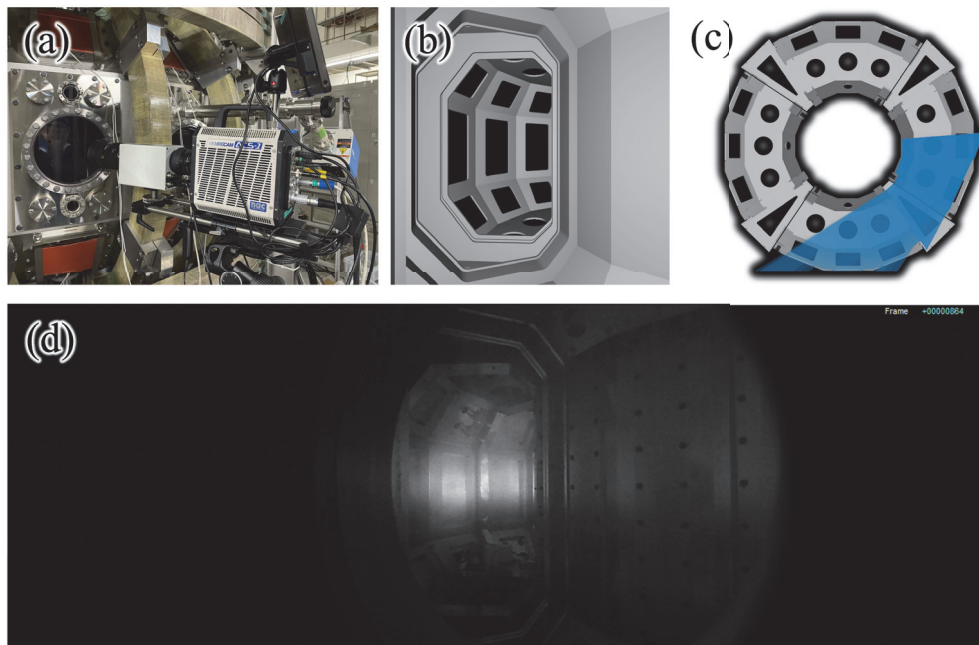


図1: 可視光撮像実験において、高速カメラ・インテンシファイア・レンズを組み合わせた計測器の写真(a)、カメラ視野のシミュレーション画像(b)、そのときのカメラ視野範囲を青い領域で示し、それをトカマク装置上部から見た図(c)、そして、実際の撮影画像(d)を表す。

### 3 実験結果・考察

#### 3.1 TPC放電とFNC放電の比較

まずはshot#7195のTPC放電①とshot#7216のFNC放電②の結果を比較する。図2に各時刻における撮像画像の積分値の時間変化を示す。②では、インテンシファイアを用いていないため、①に比べ全体の光量がかなり低くなっている。光量の時間変化としては、TPC放電の方が光量の立ち上がりが早い。一方、FNC放電では光量がゆるやかに増加していることがわかる。図3にて、各放電における撮像画像を比較すると、TPC放電では放電開始から200  $\mu$ s程度で、真空容器上側で発光分布が大きく成長している。一方、FNC放電では放電開始後、真空容器下側付近から発光が増大していることがわかる。FNC放電の場合、磁場強度が低いNull点領域から放電が開始されるため、この領域が真空容器下側に位置しているのだと予想される。より、正確には、コイル電流値から真空磁場の分布を推定し、それに基づいて放電の開始位置を特定することが必要である。

#### 3.2 TPC放電の追加磁束実験

次に、shot#7195のTPC放電①とそれに追加磁束を加えたshot#7192のTPC放電③の結果を比較する。図4に各時刻における撮像画像の積分値の時間変化を示す。③では、追加磁束を加えたことにより、放電の後半部分から大幅に光量が増加していることがわかる。図5の高速カメラによる撮像結果によると、

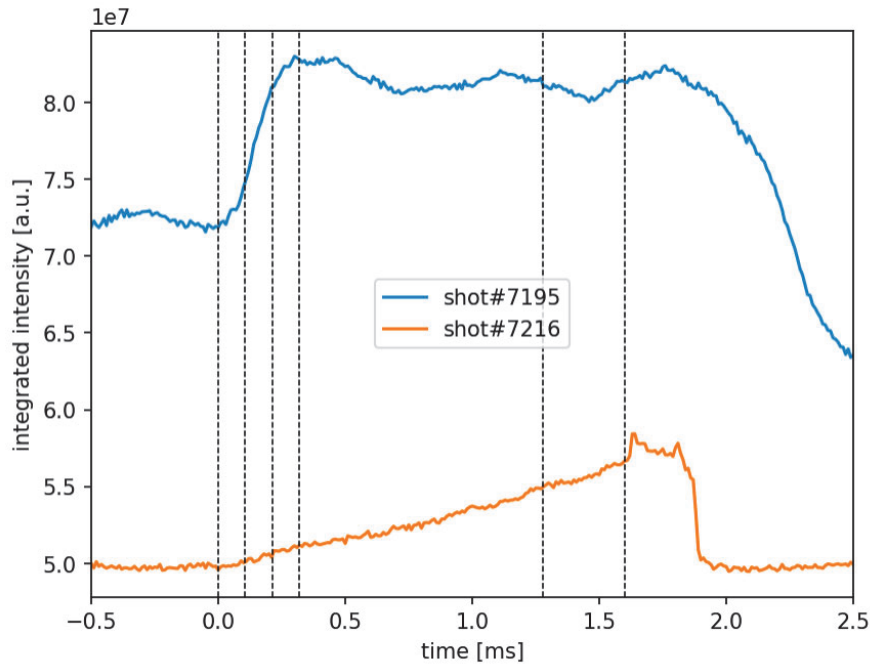


図2: 各時刻における撮像画像の積分値の時間変化。点線は図3の撮像画像の時刻に対応する。

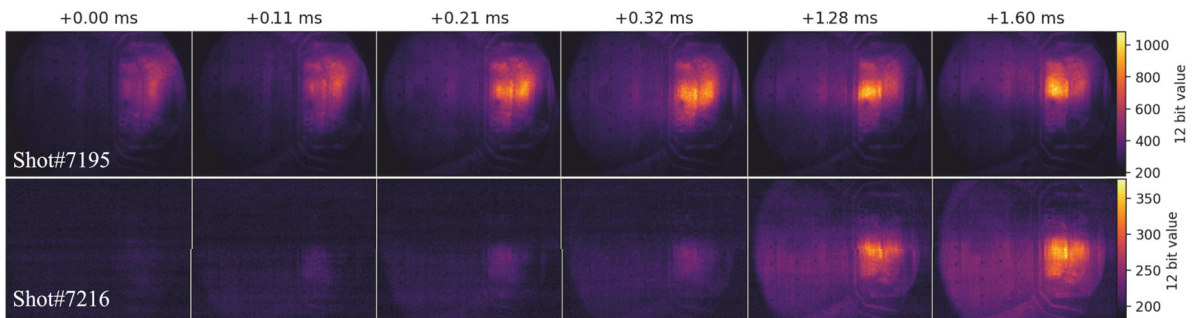


図3: shot#7195とshot#7216の高速カメラ撮像結果。各フレーム時刻は図2の点線位置に対応する。

追加磁束を加えた放電③では、1.7 ms付近から大半径内側にピークした発光が観測されており、時間が経過するにつれて発光分布が真空容器上側にて大きく成長していることがわかる。その後、大半径外側に発光分布が移動し、消滅していることがわかる。初期にTPC放電によって既に閉磁気面は形成されていると考えられるが、追加磁束を加えることで内側にてピークした発光が観測されていることから、閉磁気面の分布は大きく変化していると考えられる。より詳細な磁気面の形状解析を行うためには、発光分布だけでなく磁気計測による磁気面再構成手法が必要となる。

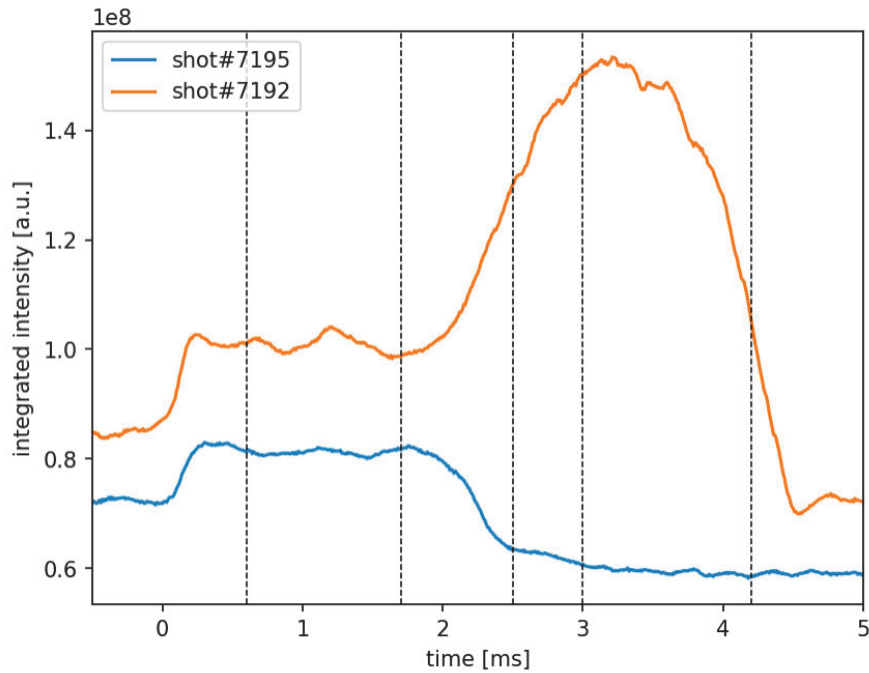


図4: 各時刻における撮像画像の積分値の時間変化。点線は図5の撮像画像の時刻に対応する。

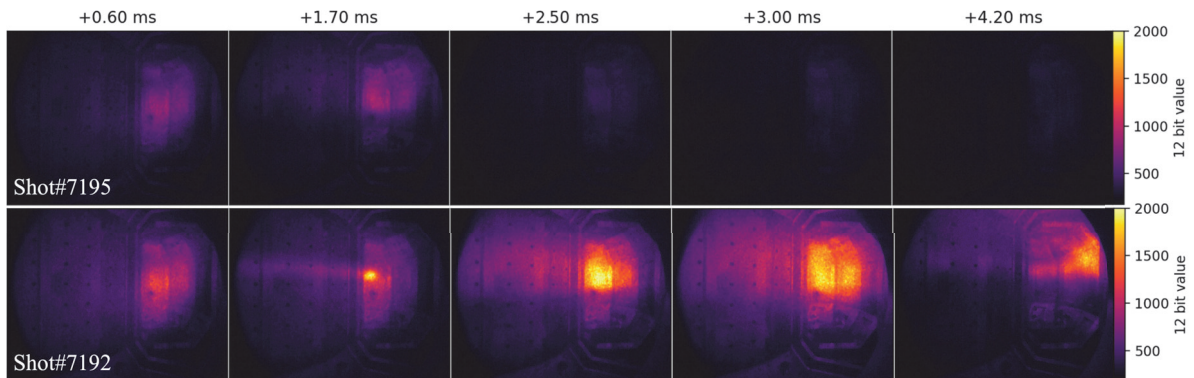


図5: shot#7195とshot#7192の高速カメラ撮像結果。各フレーム時刻は図4の点線位置に対応する。

## 4 今後の課題

本研究において、PLATOトカマクのプラズマ放電の高速撮像結果を示した。撮像結果はカメラ視野方向における積分値であるため、より正確なプラズマの位置・形状解析を行うにはポロイダル断面図での評価が必要である。これは今後、トモグラフィ手法を課すことによるプラズマ発光断面の再構成を行うことで解決する事柄である。この時、可視光発光であるため、壁からの反射光を考慮した再構成が必要である。この点は、PHiXにおける先行研究にて既に行われているため、PLATOにおいても同様の手法を適用することで、より詳細なプラズマ形状の解析が可能となる。また、磁場分布についても今後、磁気計測等を用いて解析を行うことで、プラズマ発光と両者の関係を明らかにすることができる。このような解

析を行うことで、トカマク配位形成の物理機構の理解をより深めることができると考えられる。